



Estimation de durée de vie résiduelle de Pile à Combustible par filtrage de Kalman étendu

GT S3 – 15 Septembre 2016

Mathieu Bressel^{1,2}, Mickael Hilairet¹, Daniel Hissel¹ and Belkacem Ould Bouamama²

¹FEMTO-ST, UMR CNRS 6174, FCLAB, FR CNRS 3539, Rue Thierry Mieg, 90000 Belfort, France

²CRIStAL, UMR CNRS 9189, Avenue Paul Langevin, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

Mathieu.Bressel@polytech-lille.fr

Sommaire



- I. Introduction
- II. Dispositif expérimental
- III. Pronostic de Pile à Combustible
 - 1. Méthodologie de pronostic
 - 2. Modèle de dégradation
 - 3. Estimation de l'état de santé
 - 4. Prédiction de la durée de vie résiduelle
 - 5. Résultats
- IV. Conclusion et perspectives

I. Introduction

Contexte énergétique

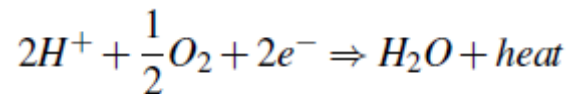
- Diminution des énergies fossiles et réchauffement climatique
-> Une transition énergétique est requise
- La Pile à Combustible à membrane échangeuse de proton:
 - est un convertisseur d'énergie prometteur
 - transforme l'hydrogène en électricité
 - sous-produits: chaleur et eau
- Permet d'alimenter en énergie:
 - des systèmes électroniques portatifs
 - des véhicules (vélo, voiture, bus etc..)
 - des bâtiments (génération de chaleur et d'électricité)



I. Introduction

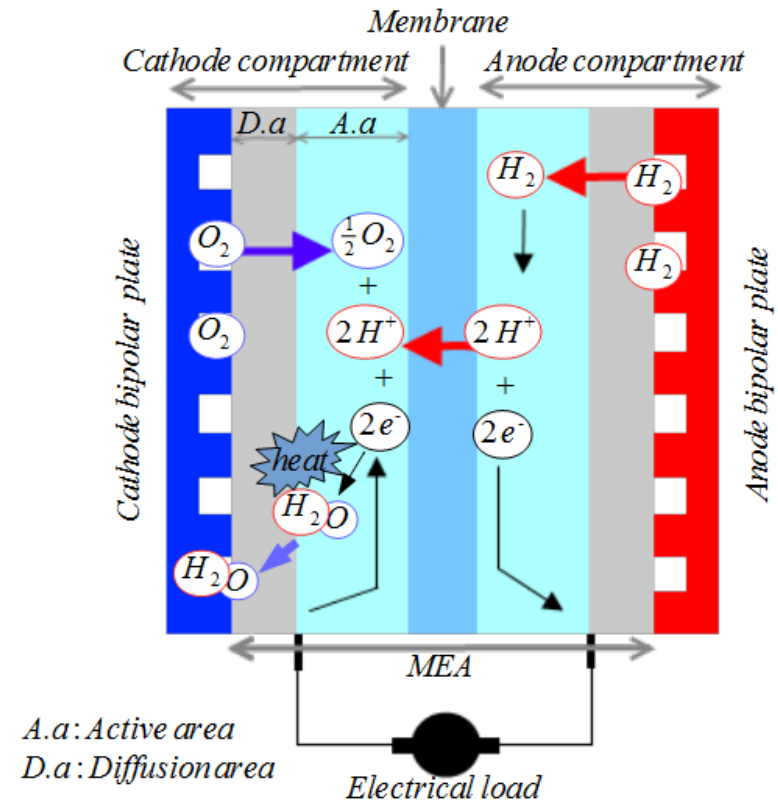
Pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC):

- où les réactions d'oxydo-réduction se produisent:



- est composé de:
 - Un assemblage membrane-électrodes (AME)
 - Une couche de diffusion des gaz (GDL)
 - Des plaques bipolaire

$$V_{st} = n \cdot \left(E_0 - R \cdot i - A \cdot T \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) - B \cdot T \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \right)$$



I. Introduction

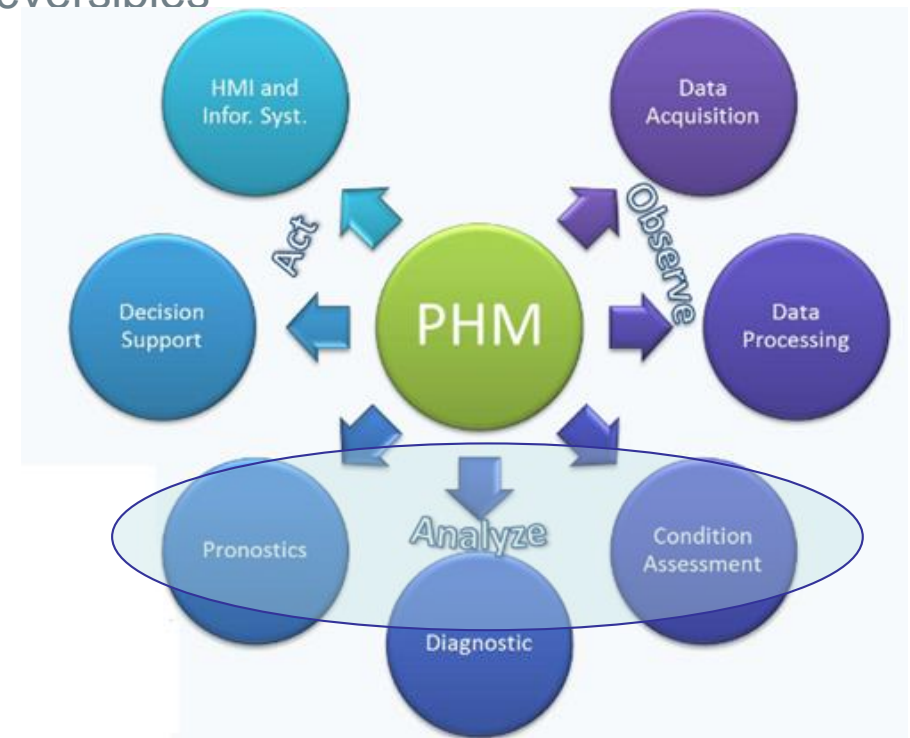
Vers le Prognostic and Health Management de PEMFC

- Le déploiement à grande échelle de la technologie est limité à cause de:
 - Une durée de vie limitée due à des dégradations irréversibles
 - Les mécanismes de détériorations ne sont pas bien compris
- Le Prognostic and Health Management permet:
la supervision, le diagnostic et le pronostic

-> Afin d'augmenter la durée de vie de ce convertisseur

Les objectifs

- Modéliser une PEMFC et du vieillissement
- Estimer l'état de santé et la vitesse de dégradation
- Prédire la durée de vie résiduelle avec des bornes d'incertitudes



II. Dispositif expérimental

PEMFC: 8 cellules, 220 cm², courant: profile automobile

- Test de 175 heures sur un banc de 10kW
- Pressions, température et HR contrôlées
- Caractérisations effectuées périodiquement
- Courant de charge:
 - densité de courant pour une tension de 0,9V pendant 10s
 - densité de courant pour une tension de 0,7V pendant 50s



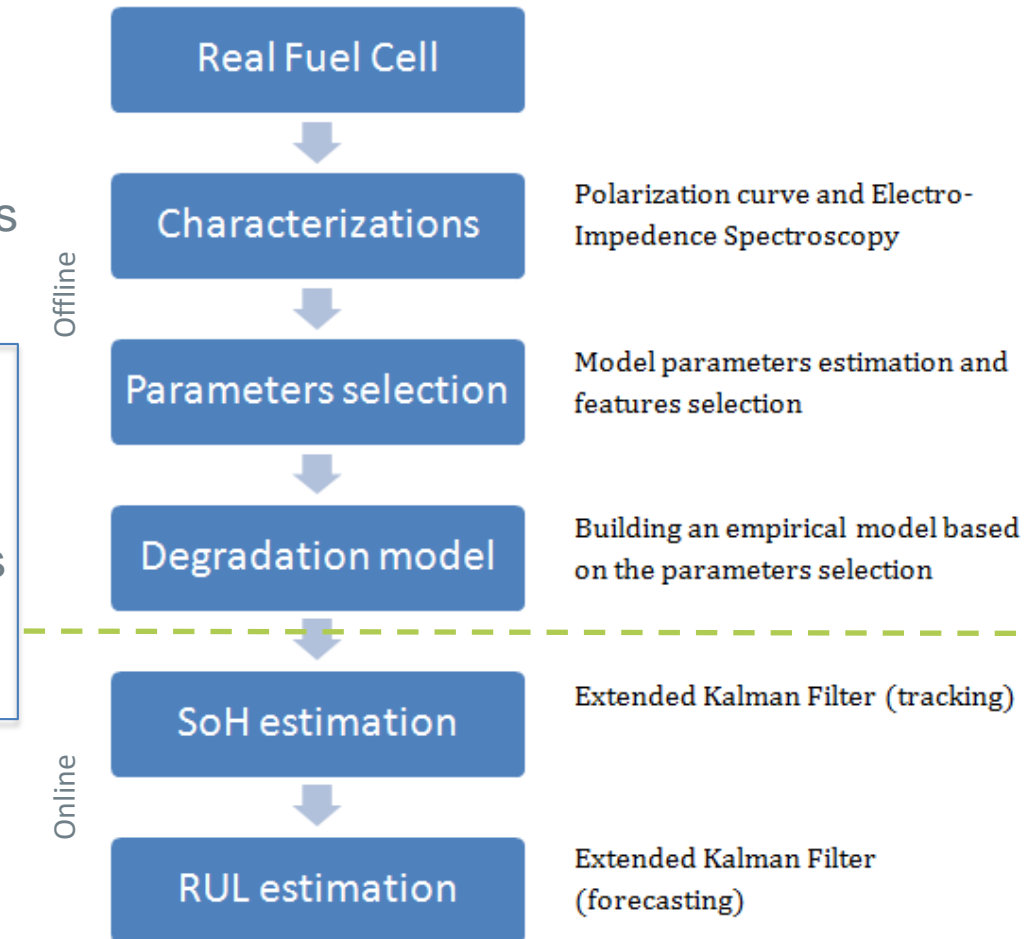
Parameter	Value
Temperature	80°C
Anode and cathode stoichiometry ratios	1.5-2
Absolute pressure anode/cathode	1.5 bar
Relative humidity anode/cathode	50%
Nominal current density i_{nom}	0.45 A.cm ⁻²
Maximal current density i_{max}	0.77 A.cm ⁻²

Confidentiel

III. Pronostic de PEMFC

Méthodologie de pronostic:

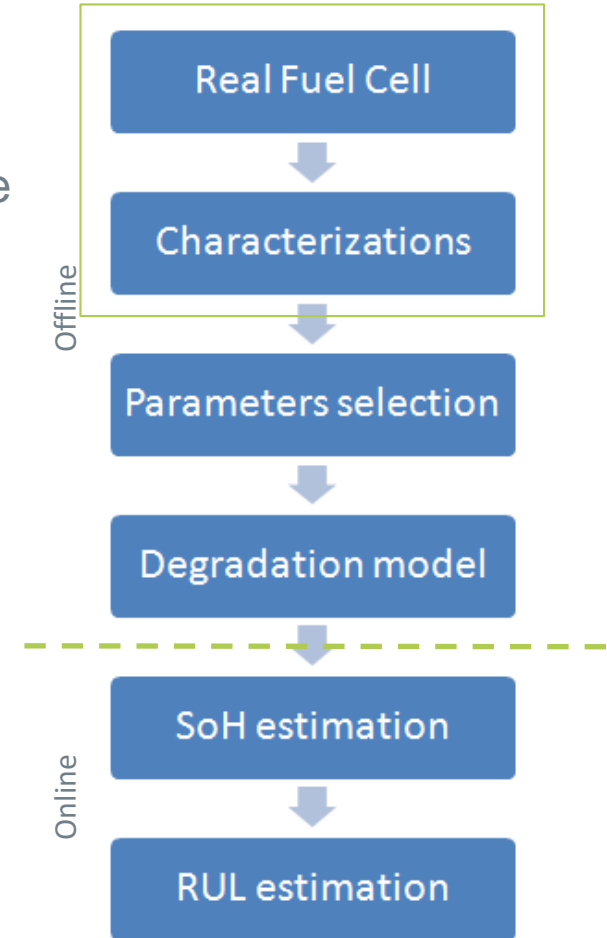
- Basé données:
 - utilise des outils d'IA
 - capable de reproduire de fortes non-linéarités
 - a besoin d'une énorme quantité de données
- Basé modèle:
 - utilise un modèle de dégradation empirique (ou physique) et un observateur
 - travail pour différentes conditions opératoires
 - faible coût de calcul
 - connaissances expertes nécessaires
- Hybride:
 - combinaison des méthodes précédentes
 - amélioration de l'entraînement
 - difficile à mettre en œuvre en ligne



III. Pronostic de PEMFC

Modèle de dégradation

- En utilisant le modèle :
$$V_{st} = n. \left(E_0 - R.i - A.T.\ln\left(\frac{i}{i_0}\right) - B.T.\ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \right)$$
- Et un algorithme d'optimisation de Levenberg-Marquardt pour extraire 4 paramètres

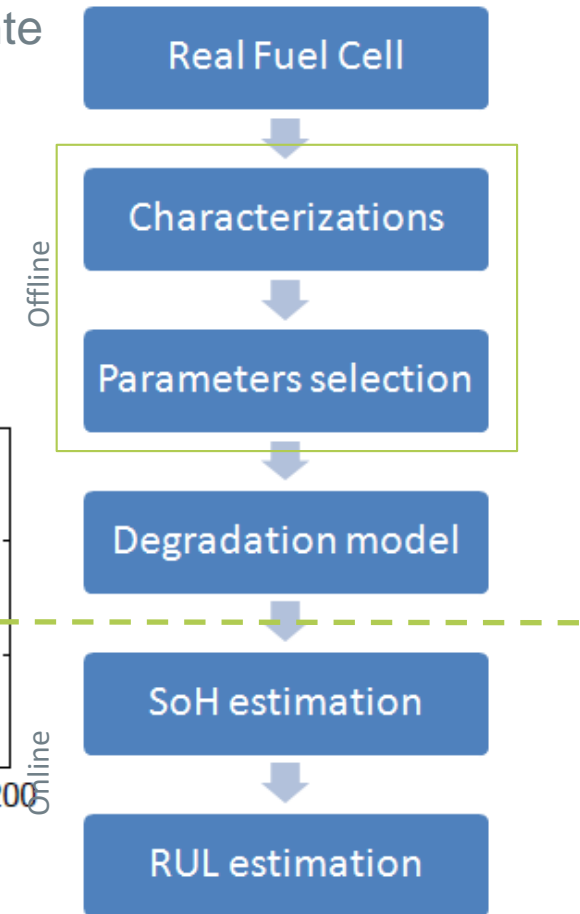
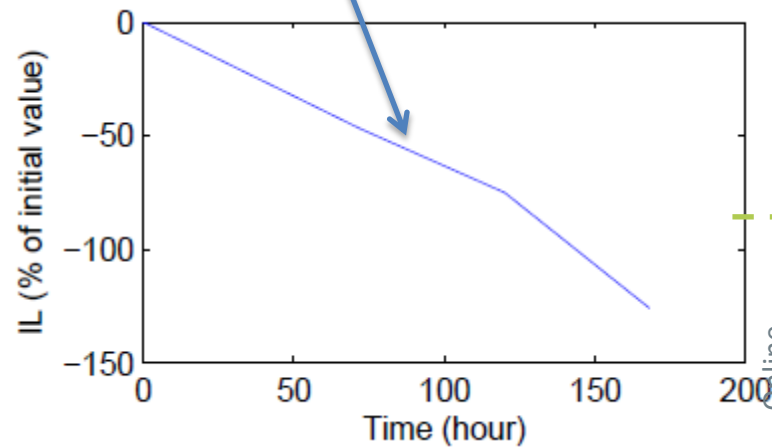
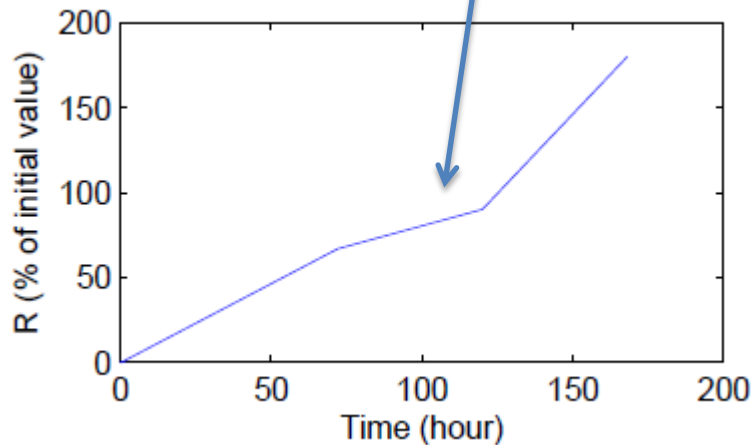


III. Pronostic de PEMFC

Modèle de dégradation

- Des paramètres extraits, seulement 2 montrent une évolution importante

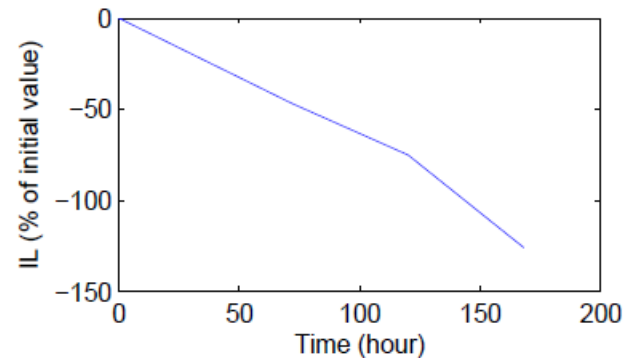
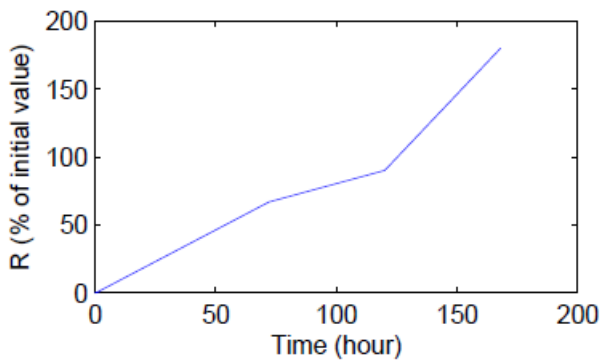
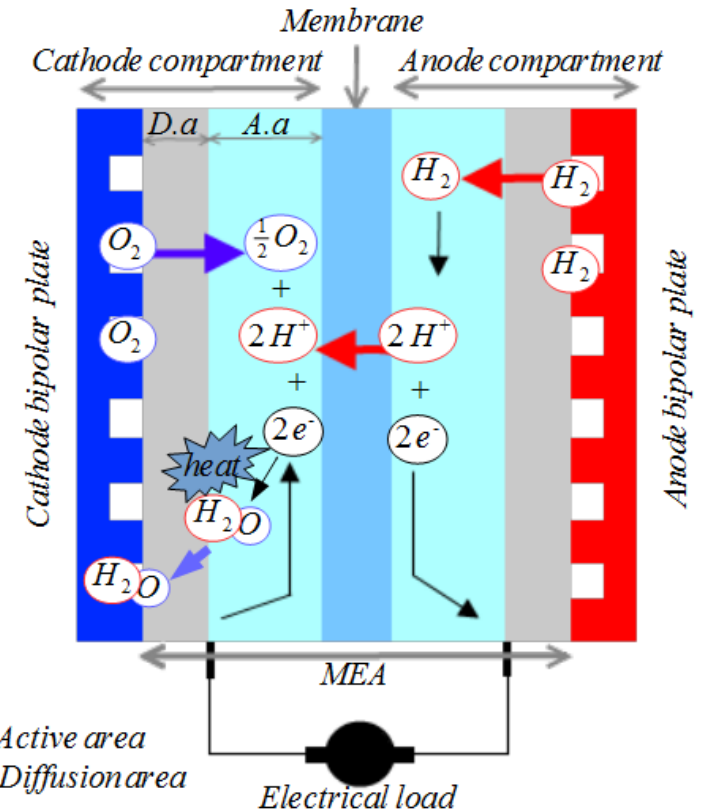
$$V_{st} = n \cdot \left(E_0 - R \cdot i - A \cdot T \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) - B \cdot T \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \right)$$



III. Pronostic de PEMFC

Modèle de dégradation

- La résistance globale augmente de 150% à cause de:
 - la déshydratation de la membrane
 - la corrosion des plaques
 - la corrosion du support catalytique
- Le courant limite diminue de 120 % à cause de:
 - la compression de la GDL
 - la perte ou agglomération des particules de catalyseur
 - une évacuation de l'eau insuffisante



III. Pronostic de PEMFC

Modèle de dégradation

- Lier l'évolution des paramètres choisis

- Modèle de dégradation:

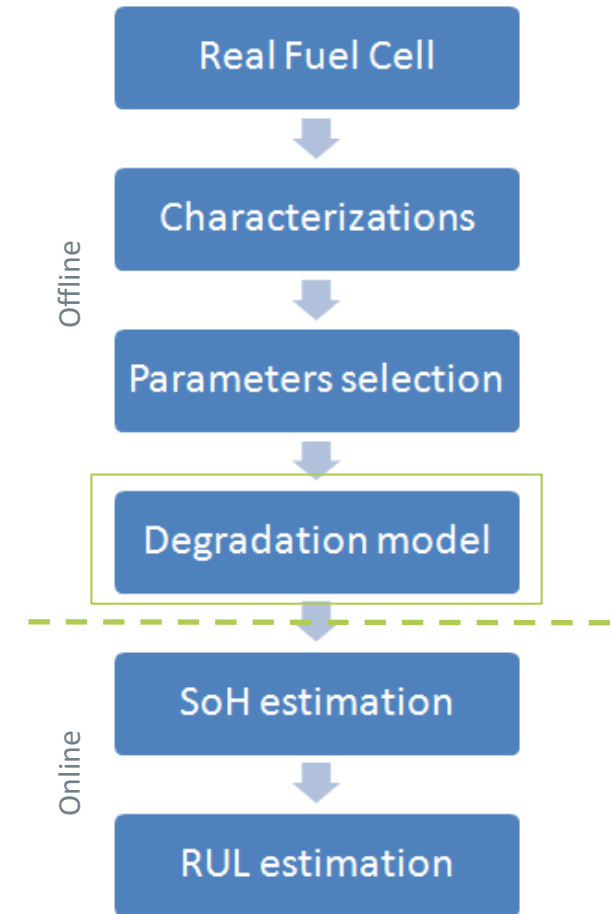
$$R(t) = R_0 \cdot (1 + \alpha(t))$$

$$I_L(t) = I_{L0} \cdot (1 - \alpha(t))$$

avec $\alpha(t) = \beta \cdot t$

- Hypothèses:

- R_0 and I_{L0} connus précisément
- Humidification constante et satisfaisante
- La déviation paramétrique suit une relation linéaire



III. Pronostic de PEMFC

Estimation de l'état de santé par filtre de Kalman étendu

$$x_{k+1} = Ax_{k|k} + w_k \quad y_k = g(x_k, u_k) + v_k \quad x_k = [\alpha_k \ \beta_k]^T \quad A = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

initialization

$$x_{0|0} = E[x(t_0)]$$

$$P_{0|0} = Var[x(t_0)]$$

prediction

$$x_{k|k-1} = Ax_{k-1|k-1}$$

$$P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q$$

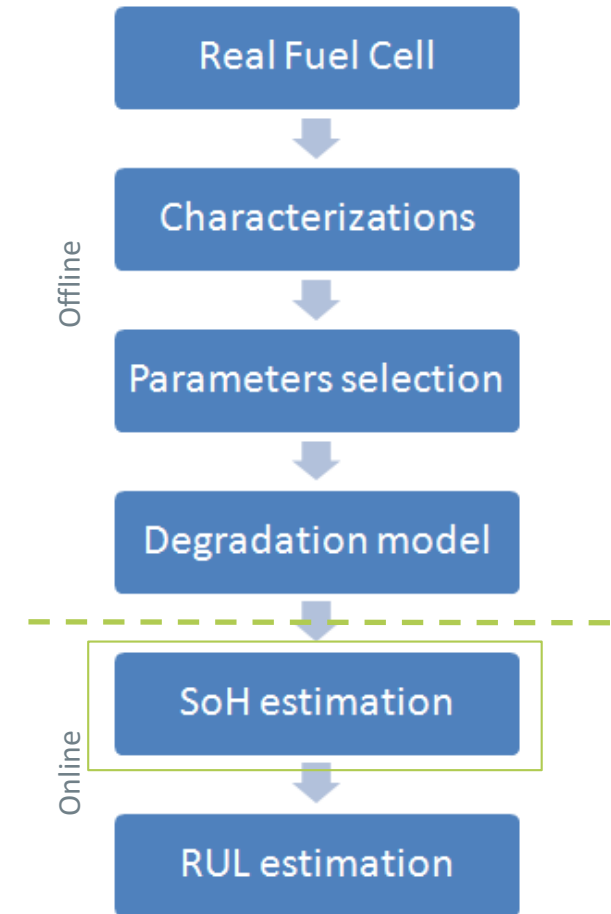
correction

$$K_k = P_{k|k-1}H_k^T (H_k P_{k|k-1}H_k^T + R)^{-1}$$

$$\text{with } H_k = \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k}$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k)P_{k|k-1}$$

$$x_{k|k} = x_{k|k-1} + K_k (V_{stk} - g(x_k, u_k))$$



III. Pronostic de PEMFC

Réglage du filtre de Kalman étendu

- Puisque l'état initial est inconnu, $x_{0|0}$ est mis à zéro
- $P_{0|0}$ est réglé en résolvant l'équation algébrique de Riccati en régime stabilisé

$$AP_{k|k}A^T - P_{k|k} - AP_{k|k}H_k^T M H_k P_{k|k}A^T + Q = 0$$

$$\text{with } M = (H_k P_{k|k} H_k^T + R)^{-1}$$

- L'EKF donne l'estimation d'état optimale donnée par la fonction de densité de probabilité:

$$p(x_k|y_k) \sim N(\hat{x}_k, P_k) \quad \text{avec} \quad P_k = \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha_k}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta_k}^2 \end{bmatrix}$$

- P_k donne l'incertitude, cependant elle est dépendent des bruits de mesure et de process
-> Pour obtenir l'incertitude, il faut régler correctement les matrices Q et R
- R est obtenu en calculant le carré de l'écart-type sur la tension mesurée
- Q est obtenu par optimisation sur un autre jeu de donnée

III. Pronostic de PEMFC

Prédiction du RUL

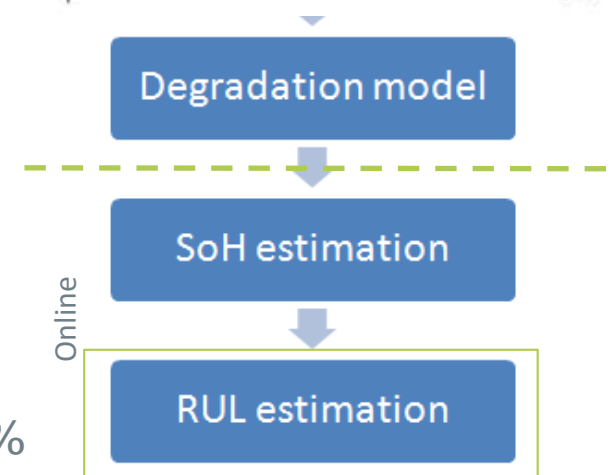
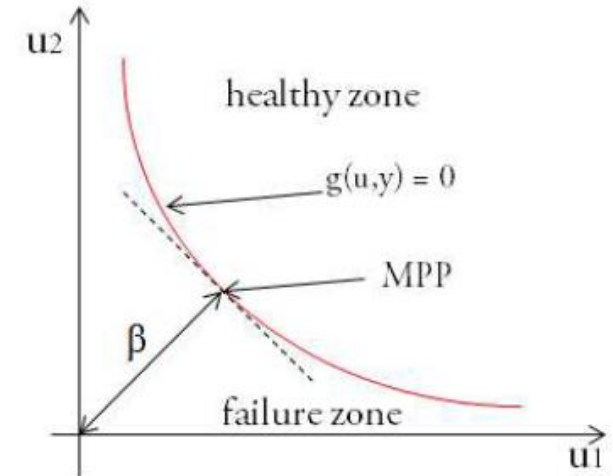
- Afin d'avoir un coût calculatoire faible, le RUL et l'incertitude sont estimés par une méthode analytique
- Inverse First Order Reliability Method (IFORM):
 - permet d'estimer le RUL
 - avec des bornes de probabilité
- La méthode requière une fonction d'état limite $g(u,y)$

$$g(u,y) = RUL_k(u) - y \quad RUL_k = \frac{\alpha_{max} - \alpha_k}{\beta_k \cdot T_s}$$

- Et vise à trouver le point le plus probable (MPP) pour une probabilité de défaillance donnée P_f

$$\|u\| = \beta_{target} \quad \beta_{target} = \Phi^{-1}(P_f)$$

- Avec $P_f = \{0,05; 0,05, 0,095\}$, obtention du RUL avec une certitude de 90%



III. Pronostic de PEMFC



Prédiction du RUL

1. Le compteur j est mis à zéro et une première estimation du MPP est faite
2. Les coordonnées du point sont transformées dans l'espace normalisé (grâce à la variance et la moyenne de l'EKF)

$$u_i^j = \frac{x_i^j - \mu_i}{\sigma_i}$$

3. Le gradient de la fonction d'état limite est calculé en ce point

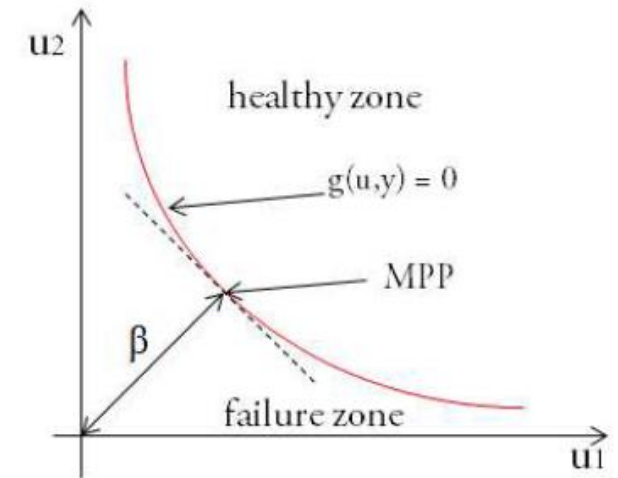
$$a_i = \frac{\partial g}{\partial u_i} = \frac{\partial g}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial u_i}$$

4. Le point suivant est calculé

$$u^{j+1} = -\frac{a}{|a|} \cdot \beta_{target}$$

5. Les étapes 3 et 4 sont répétées jusqu'à convergence (~5 itérations)

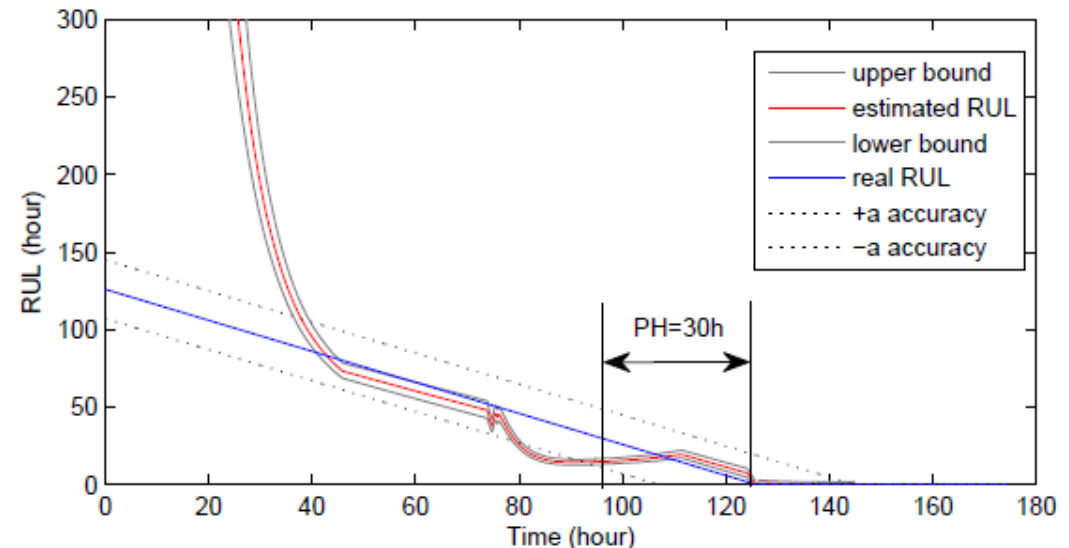
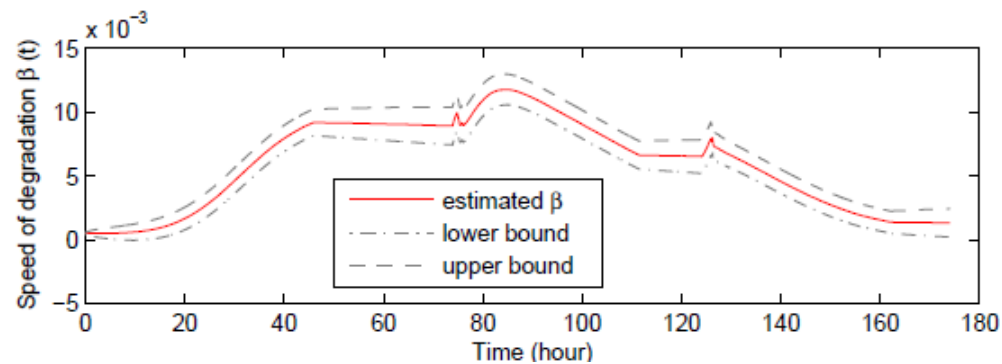
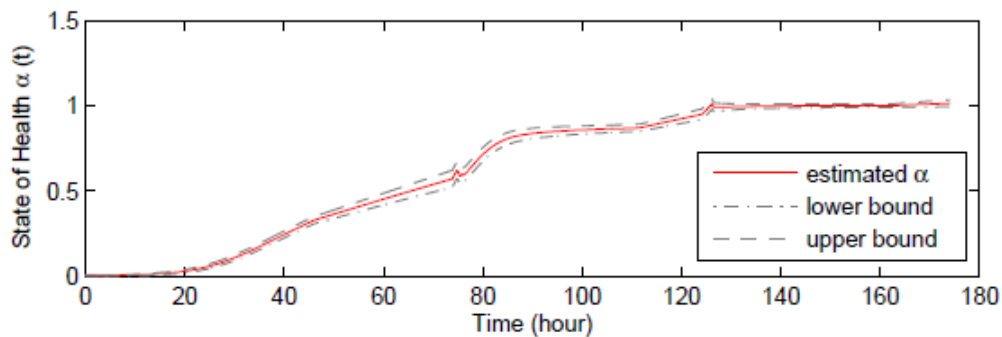
$$|g(x^j) - y| \leq \delta_1 \quad |x^{j+1} - x^j| \leq \delta_2$$



III. Pronostic de PEMFC

Résultats expérimentaux

- Estimation de l'état de santé et de la vitesse de dégradation à 99% par l'EKF
 - estimation précise de l'état de santé
- Prédiction du RUL avec une probabilité de 90% par l'IFORM (avec $\alpha_{max} = 100\%$)
 - incertitude bornée à $t=40h$, $PH=30h$
 - temps total de calcul: 22s (avec $T_e = 1$ échantillon/s)



IV. Conclusion and perspectives



Conclusion

- Résultats prometteurs malgré une vitesse de dégradation inconnue sur un profile hautement dynamique
- La méthode fournit la confiance sur l'estimation de l'état de santé et du RUL
- Coût calculatoire faible, peut être implanté en ligne

Cependant,

- Hypothèse forte de vieillissement couplé entre R et IL
- RUL mal estimé lorsque la vitesse de dégradation varie trop rapidement
- Bruit de mesure considéré constant

Perspectives

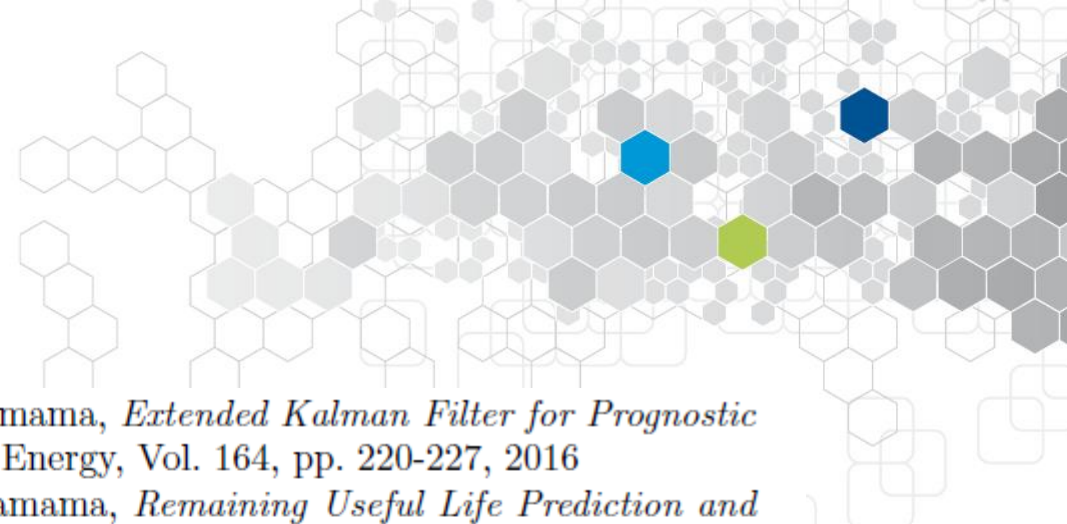
- Valider les hypothèses sur d'autres conditions opératoires et PEMFC
- Incorporer une estimation en ligne du bruit de mesure
- Affiner le modèle de dégradation (pour en prendre en compte les conditions opératoires)



Ce travail est entièrement financé par le projet
ANR PROPICE

propice.ens2m.fr

Mathieu BRESSEL
Mathieu.Bressel@polytech-lille.fr



- M. Bressel, M. Hilairet, D. Hissel, B. Ould Bouamama, *Extended Kalman Filter for Prognostic of Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, Applied Energy, Vol. 164, pp. 220-227, 2016
- M. Bressel, M. Hilairet, D. Hissel, B. Ould Bouamama, *Remaining Useful Life Prediction and Uncertainty Quantification of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Under Variable Load*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 63(4), pp. 2569-2577, 2016
- M. Jouin, M. Bressel, S. Morando, R. Gouriveau, D. Hissel, M.C. Péra, N. Zerhouni, S. Jemei, M. Hilairet, and B. Ould Bouamama, *Estimating the end-of-life of PEM fuel cells : guidelines and metrics*, Applied Energy, Vol. 177, pp. 87-97, 2016
- M.S Jha, M. Bressel, B. Ould Bouamama, G. Dauphin-Tanguy, M. Hilairet and D. Hissel, *Particle Filter Based Prognostics of PEM Fuel Cell Under Constant Load*, Accepted for publication in International Journal of Renewable Energy Research, 2016
- M.S Jha, M. Bressel, B. Ould Bouamama, G. Dauphin-Tanguy, *Particle Filter Based Hybrid Prognostics of Proton Exchange Membrane Fuel Cell in Bond Graph Framework*, Submitted to Computers & Chemical Engineering, 2016
- M. Bressel, M. Hilairet, D. Hissel, B. Ould-Bouamama, *Fuel Cells Remaining Useful Life estimation using an Extended Kalman Filter*, 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronic Society, IEEE IECON 2015, Yokohama, Japan, 9-12 November, 2015, Best presentation recognition in the special session entitled "Fault Detection, Diagnostics and Prognostics in Electromechanical Devices"
- M.S. Jha, M. Bressel, B. Ould-Bouamama , G. Dauphin-Tanguy , M. Hilairet and D. Hissel, *Particle Filter Based Prognostics of PEM Fuel Cell in Bond Graph Framework*, 3ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables, CIER 2015, Sousse, Tunisia, 21-23 December, 2015